Zl. 20430-02/79
B 3167/8. 2. 1979

Beiträge zur Verwendung von Flechten als Bioindikatoren
II. Mögliche Einflüsse von Temperatur und Jahreszeit*)

Von WOLFGANG PUNZ

Mit 13 Abbildungen

(Vorgelegt in der Sitzung der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse am 8. November 1979 durch das w. M. WILHELM KÜHNELT)

I. Einleitung

Die Methode der Bioindikation von Schadstoffen mit Hilfe von Flechten umfaßt prinzipiell zwei verschiedene Möglichkeiten: Die eine stützt sich auf das natürliche Vorkommen von Flechten und versucht im wesentlichen, aus dessen Verarmung in einem bestimmten zu untersuchenden Areal Rückschlüsse auf den Grad der Verschmutzung ebendieses Gebietes zu ziehen. Die genannte Methode wurde insbesondere in England erarbeitet und praktiziert; ihre natürliche conditio sine qua non stellt das Vorhandensein einer ausreichenden „diversity of species" dar, die jedenfalls erforderlich ist, um eine Reduktion derselben zweifelsfrei feststellen zu können (vgl. etwa GILBERT [1970] u. v. a.).

Demgegenüber hat die sogenannte Transplantationsmethode in ihren verschiedenen Variationen den Vorzug, auch Aussagen bezüglich der Immission von Gebieten treffen zu können, die einer Flechtenvegetation bereits mehr oder minder ermangeln. Ihr großer Nachteil dagegen ist die völlige Veränderung der trophisch/mikroklimatischen Bedingungen, denen die Flechte bis zum Zeitpunkt ihrer Verwendung als Transplantat ausgesetzt war (und an die sie wohl auch entsprechend adaptiert war).

---

*) Publ. Nr. 28 der MAB-Projektgruppe Stadtökologie

Folgerichtig erhebt sich die Notwendigkeit, neben der Wirkung der zu untersuchenden Immission auch die Konsequenzen einer ziemlich weitgehenden Veränderung in den allgemeinen ökologischen Konditionen in Rechnung stellen bzw. abschätzen zu müssen (vgl. etwa PEARSON, 1973; KÖHLE, 1977; RIEDL, 1978).

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sollten daher – unter dem Blickwinkel der vorgestellten Ausführungen – vor allem einen Beitrag zu den Auswirkungen von Jahreszeit und Temperatur auf verschiedene Parameter des Flechtenstoffwechsels unter Schadstoffstreß liefern.

II. Material und Methoden (vgl. auch PUNZ, i. pr.)

Material Versuchsobjekt war die Flechte *Hypogymnia physodes* (L.)Nyl.

Kultur- und Klimabedingungen Für die Laboruntersuchungen (vgl. PUNZ, i. pr.) wurden die Flechten unmittelbar vor einem Versuch eingebracht, gewaschen und in offenen Petrischalen ausgelegt. Die Versuchsdurchführung erfolgte in einem VÖTSCH-Ecophyt (Type 01/1000) unter folgenden Bedingungen: 12:12 h Tag, Beleuchtung 132 µEinstein cm^{-2} s^{-1}, Temperatur 20° C (bzw. für die Messung variiert von 0 bis 20° C), relative Luftfeuchtigkeit zwischen 55 und 65 %, befeuchten (mit A. dest.) grundsätzlich einmal täglich. Für die Freilanduntersuchungen wurden die Flechten gesammelt, gewaschen und in Plastiknetzchen (vgl. SCHUMM, 1975) eingeschlossen. Die so vorbereiteten Flechtenproben wurden sodann in verschiedenen Abständen von der Fahrbahn der Südautobahn exponiert (zu diesem Zweck wurden die Transplantate ca. 25 cm über dem Boden an Holzleisten befestigt). Die Standorte für die Exposition wurde vor allem nach zwei Gesichtspunkten ausgewählt: Einerseits sollten Unterschiede im Mikroklima zwischen den einzelnen Standorten möglichst vernachlässigbar sein (z. B. eine ebene Wiese neben der Fahrbahn, ein Bahndamm etc.), zum andern war in Hinblick auf die lange Expositionszeit auf die Möglichkeit einer Beeinträchtigung durch Tier und Mensch Bedacht zu nehmen (tatsächlich mußte ein parallel laufender Versuch mit Efeu-Testpflanzen infolge der Verluste durch Tierfraß abgebrochen werden). Die in dieser Arbeit besprochenen Ergebnisse stammen von Transplantaten an einem Bahndamm (vgl. Abb. 1a), der in einem Winkel von ca. 37° an die Autobahn herankommt und sich durch eine gleichmäßige Böschung auszeichnet. Die Autobahn ist an dieser Stelle von Feldern umgeben; in einer Entfernung von ca. 1 km ostwärts liegen die ersten Häuser eines kleinen Ortes, im NW beginnt in ca. 1 km Entfernung ein größeres Betriebs- und Industriegebiet. Die Transplantate wurden nach 1, 3 und 5 Monaten eingebracht und gewaschen; nach 2 Tagen Vorkultur (15° C, 11 $W.m^{-2}$, 12:12 Stunden) wurde

90 m
Standort 'B'
AUTOBAHN
BAHNDAMM
N
8 m
Standort 'A'
Abb. 1a

Abb. 1a: Lage der Standorte für die Transplantatversuche (Hauptwindrichtung: W).

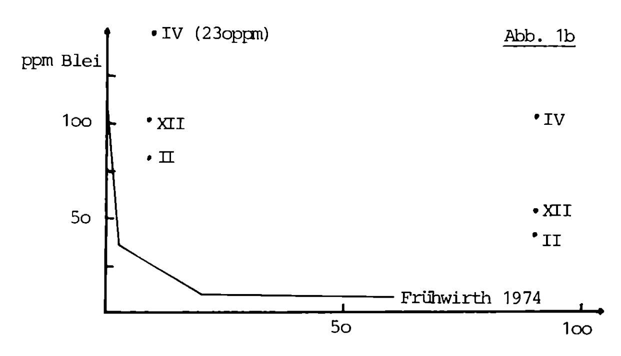


Abb. 1b: Bleigehalt der exponierten Flechten in Relation zu ihrer Entfernung von der Autobahn im Dezember, Februar, April; zum Vergleich die „Bleigehalte von Grasproben in verschiedenen Entfernungen vom Straßenrand", aus FRÜHWIRTH (1974); Werte: Neunkirchner Allee.

ihre Photosynthese (bei 5, 10 und 15° C, 20 $W.m^{-2}$) gemessen und ggf. Wassergehalt und Bleigehalt bestimmt.

Schadstoffbehandlung: Diese erfolgte (bei den Laborversuchen) in der gleichen Weise wie bei PUNZ (i. pr.) beschrieben; hier werden lediglich Konzentration und Zeit der Applikation wiedergegeben: Blei als $Pb(NO_3)_2$, 0.001 m, 18 h; Kochsalz (NaCl) 0.001 m, 18 h; Schwefeldioxid (SO_2) 5 ppm, 3 h; Kombinationen von Blei und Kochsalz simultan, Schwefeldioxid jeweils nach Applikation von Blei/Salz. Anschließend an die Behandlung wurden die Proben mit A. font. (3 Minuten) und A. dest. (2 Minuten) gewaschen.

Gaswechselmessung: wie bei PUNZ (i. pr.) beschrieben, im geschlossenen System mit einem URAS II (Fa. HARTMANN und BRAUN).

Chlorophyllbestimmung (vgl. PUNZ, i. pr.): im wesentlichen nach der von SCHOPFER (1970) beschriebenen Methode (unter Verwendung der sechsfachen NH_3-Konzentration), Messung der Absorption bei 534, 647, 664, 720 nm. Der R_t-Wert entspricht dem Quotienten der Absorptionswerte bei 664 und 534 nm (abzüglich Trübung). Die Ergebnisse wurden nach dem Verhalten nitratbehandelter Parallelproben (0.002 m $NaNO_3$) korrigiert, was geringfügige quantitative Verschiebungen zur Folge hatte (und im wesentlichen die beobachteten Tendenzen eher verstärkte).

Bleibestimmung: an gewaschenen (10 Minuten A. font.) Proben; Aufschlußmethode von ALBERT et al. (1976); Messung an einem Atomabsorptions-Spektrophotometer (VARIAN TECHTRON). Die Bleiwerte wurden in ppm Blei ausgedrückt und sind auf das Trockengewicht der Flechten bezogen.

Säurebestimmung: Extraktion der gemahlenen, getrockneten Flechten (Heißwasserextrakt), Titration (Potentiograph, Fa. INULA); daraus wurde der Säuregehalt ermittelt (Angabe in µval).

Wassergehalt: Die behelfsmäßige Bestimmung des Wassergehalts erfolgte nach STOCKER (1956): Aufsättigung der lufttrockenen Flechten in A. dest. (6 h), anschließend Wägung; die gewonnenen Ergebnisse waren gut reproduzierbar.

Grundsätzliches zur Auswertung: Die Werte der Laborversuche stellen Mittelwerte von 2–3 Einzelproben dar. Die geringe Probenzahl der Transplantatversuche machte einen Verzicht auf die Auswertung der Absolutwerte und eine Beschränkung auf mehrmals sich wiederholende Phänomene („Trends") notwendig. Neben der Auswertung der Photosynthesewerte selbst wurde der Versuch gemacht, den Temperaturkoeffizienten der Photosynthese (Q_T, im vorliegenden Fall Q_5 = Photosynthese bei [n+5] ° C/Photosynthese bei n ° C) zu errechnen; dieser stellt ein Kriterium für die Temperaturabhängigkeit komplexer Prozesse (KALCKSTEIN, 1976) dar und gibt die Optimumstemperatur der

Photosynthese ($Q_T = 1$) an. Formal beschreibt der Q_T eine Kurve, kann aber in einem mittleren Bereich linear interpretiert werden (Abb. 2; vgl. auch PUNZ, i. pr.).

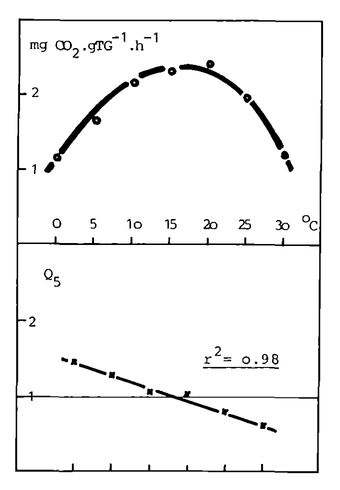


Abb. 2: Temperaturabhängigkeit der Photosynthese von *Hypogymnia physodes* L.(Nyl.); darunter: der Temperaturkoeffizient der Photosynthese (Q_5).

III. Ergebnisse

1. Jahreszeitliche Veränderungen der Schadstoffwirkung

Im Rahmen einer Untersuchung über die Wirkung von Schadstoffkombinationen auf Flechten, die sich über mehrere Jahre erstreckte, war es möglich, Aufschluß über den Einfluß des Aufsammlungszeitpunktes auf die Schadstoffwirkung zu gewinnen. Bekanntlich unterliegen zahlreiche Parameter des Flechtenstoffwechsels einer jahreszeitlichen Schwankung. Der Verlauf der Photosynthesewerte im Untersuchungszeitraum entspricht in seiner Tendenz dem in der Literatur beschriebenen Verhalten: ein winterliches Maximum der Photosynthese, im Sommer ein Tiefpunkt in der Produktion (Abb. 3). Auch die jahreszeitliche Veränderung der untersuchten Chlorophyllparameter ist mit den anderweitig bekannten Ergebnissen vergleichbar: hoher Chlorophyllgehalt im Winter, gesenkter R_t-Wert im Sommer, eher schwächer ausgeprägte jahreszeitliche Unterschiede beim a/b-Verhältnis (Abb. 4). (Der Säuregehalt ist im Herbst [XI: 137 μval] höher als im Sommer [VIII: 77.7 μval], was die Möglichkeit eines Versuchsfehlers infolge Säureschädigung bei der Extraktion stark herabsetzt.)

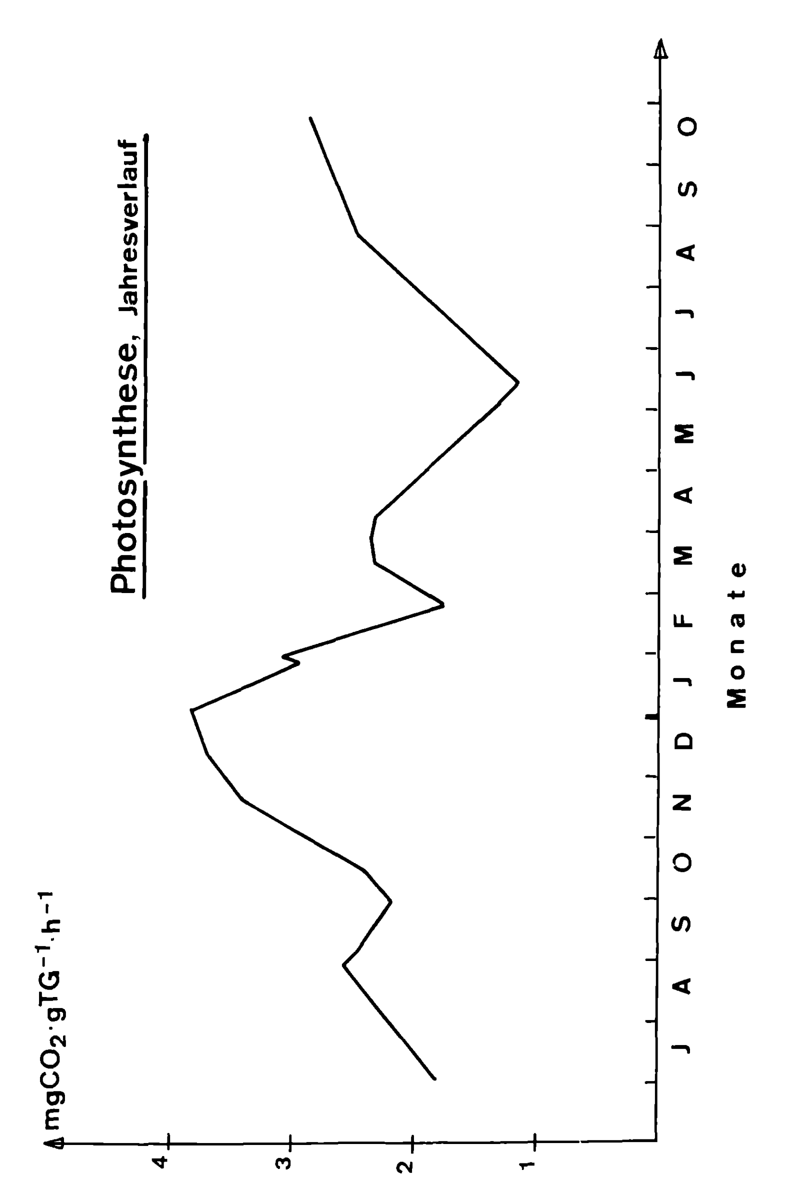


Abb. 3: Jahresverlauf der Photosynthese von *Hypogymnia physodes* (Messung unmittelbar nach Einbringen 20° C, 132 µEinstein cm^{-2} · s^{-1}), Juli 1974 bis Oktober 1975.

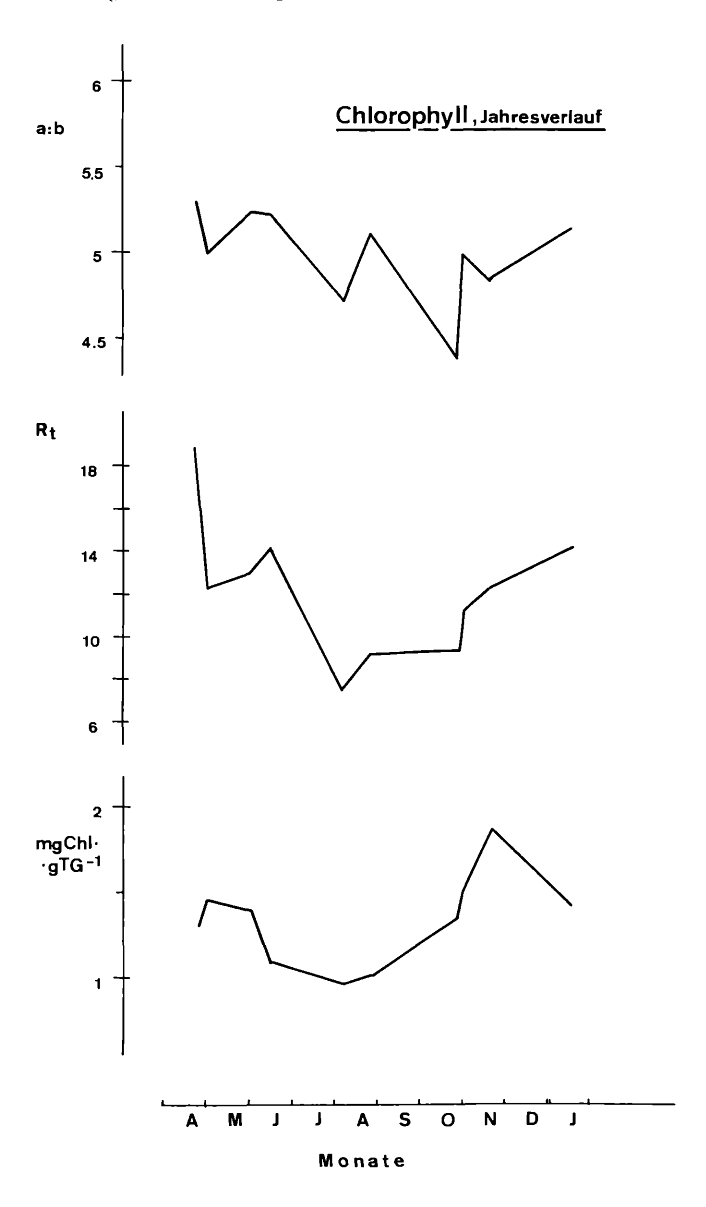


Abb. 4: Jahresverlauf von Chlorophyllgehalt, a/b-Verhältnis und R_t-Wert bei *Hypogymnia physodes* (Messung nach Einbringen), April 1975 bis Jänner 1976.

Es sei auf STALFELT (1939), WILHELMSEN (1959), SMITH (1962), HARRIS (1971), VERSEGHY (1972), FARRAR (1973) hingewiesen.

Betrachtet man zunächst die Werte der Photosynthese nach Schadstoffbehandlung (Abb. 5), so ist bei den Schäden durch Blei und Kochsalz

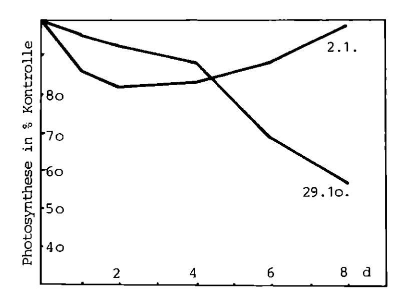


Abb. 5: Photosynthesewerte (in %-Kontrolle) von *Hypogymnia physodes* nach Behandlung mit 5 ppm SO_2, 3 h; die Proben wurden im Oktober bzw. Dezember eingebracht.

sowie alle Kombinationen kein merkbarer Einfluß des Aufsammlungszeitpunktes festzustellen. Lediglich bei Schwefeldioxidbehandlung dürfte die Wirkung des Schadgases deutlich davon abhängen, in welchem physiologischen Zustand sich die Flechten befinden: So ist im Herbst (29. 10.) nach Begasung mit SO_2 nach einer Woche eine noch fortschreitende Schädigung zu erkennen, wohingegen im Jänner (2. 1.) eine Erholung der Photosynthese nach Applikation der gleichen Dosis beobachtbar war: Die im Winter stoffwechselphysiologisch aktiveren Flechten sind unter Umständen besser zur Regeneration eines einmaligen Schadstoffstoßes befähigt als im Herbst (was freilich, wie nochmals betont werden muß, nur für den Fall einer einmaligen Schwefeldioxidgabe gilt). Demgegenüber zeigen sich bei den verschiedenen Chlorophyllparametern (Abb. 6–8) mehr oder weniger deutliche jahreszeitliche Unterschiede in der Schadstoffwirkung. Wie aus dem oben Gesagten hervorzugehen scheint, können diese Veränderungen wohl in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit der Photosyntheseaktivität stehen, da bei dieser ja keine jahreszeitliche Abhängigkeit der Schadstoffwirkung feststellbar war (Ausnahme: SO_2); tatsächlich konnten wir in entsprechenden Vergleichsuntersuchungen generell keine deutliche Korrelation von Chlorophyllgehalt und Photosyntheserate ermitteln ($r^2 = 0.21$), was den Ergebnissen von VERSEGHY (1972) entspricht; dagegen konnte BÜTTNER (1971) eine derartige Beziehung sehr wohl beobachten. Was nun also die Chlorophyllergebnisse betrifft, so zeigten erwartungsgemäß die a/b-Werte bei praktisch allen Schadstoffkombinationen nur geringe jahreszeitliche Unterschiede. Zum R_t-Wert nach Schadstoffbehandlung ist zunächst festzu-

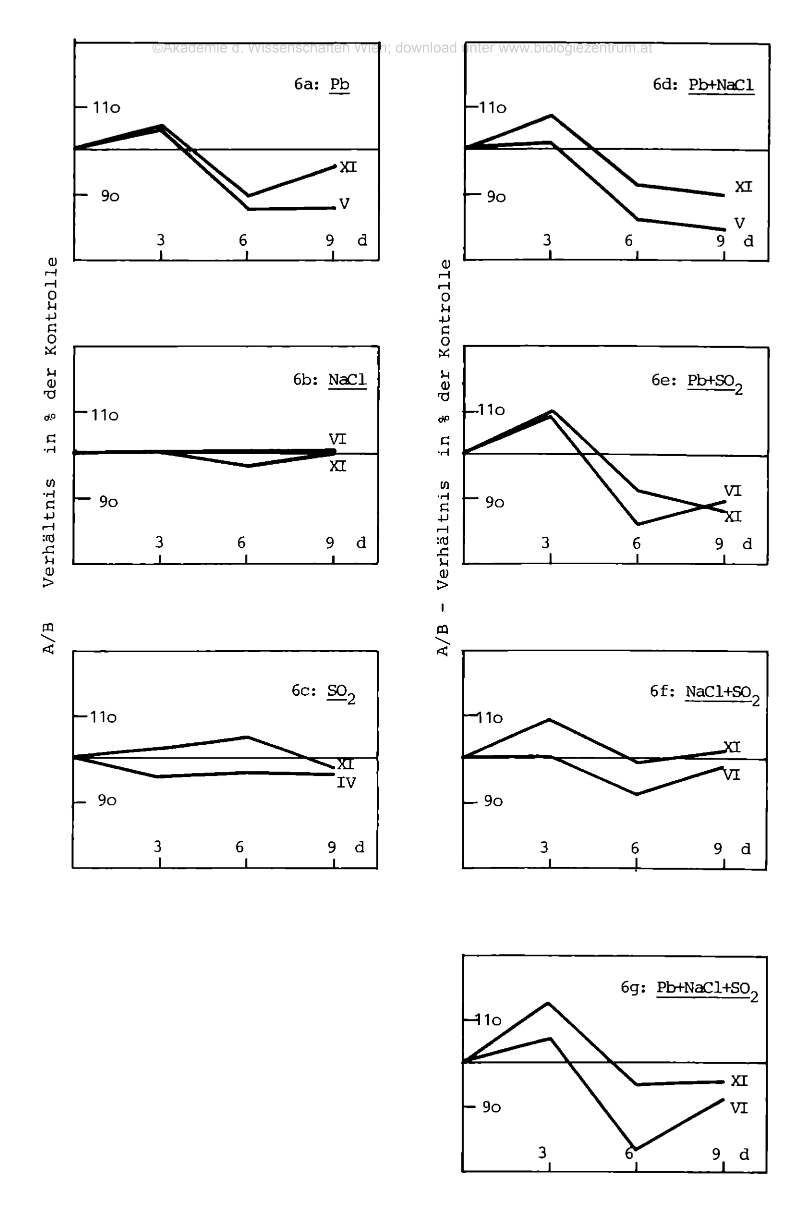


Abb. 6: a/b-Verhältnis schadstoffbehandelter Flechten *(Hypogymnia physodes)* in %-Kontrolle zu verschiedenen Jahreszeiten; a – 0.001 m Pb $(NO_3)_2$, 18 h; b – 0.001 m NaCl, 18 h; c – 5 ppm SO_2, 3 h; d – a und b simultan; e – a und c sukzessiv; f – b und c sukzessiv; g – a und b simultan, c sukzessiv. Die römischen Zahlen geben den Versuchsmonat an.

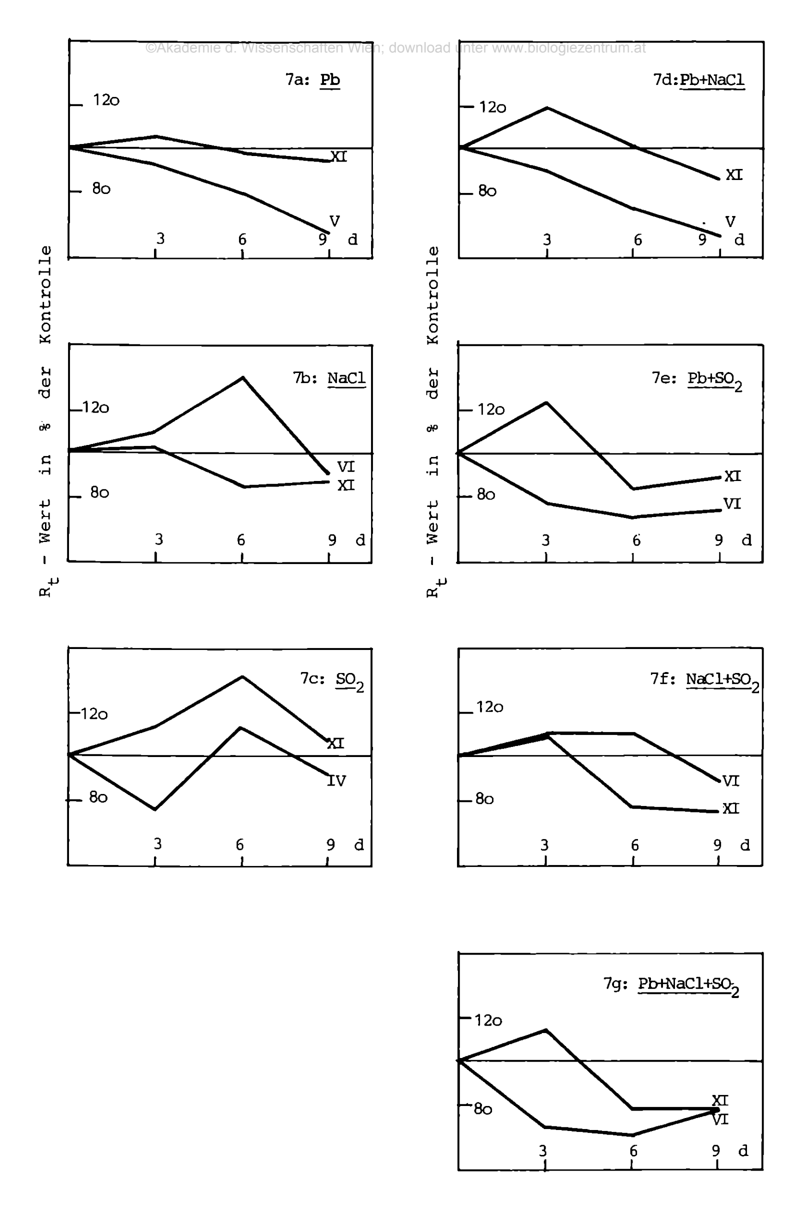


Abb. 7: R_t-Wert schadstoffbehandelter Flechten *(Hypogymnia physodes)* in %-Kontrolle zu verschiedenen Jahreszeiten; a bis g wie in Abb. 6; die römischen Zahlen geben den Versuchsmonat an.

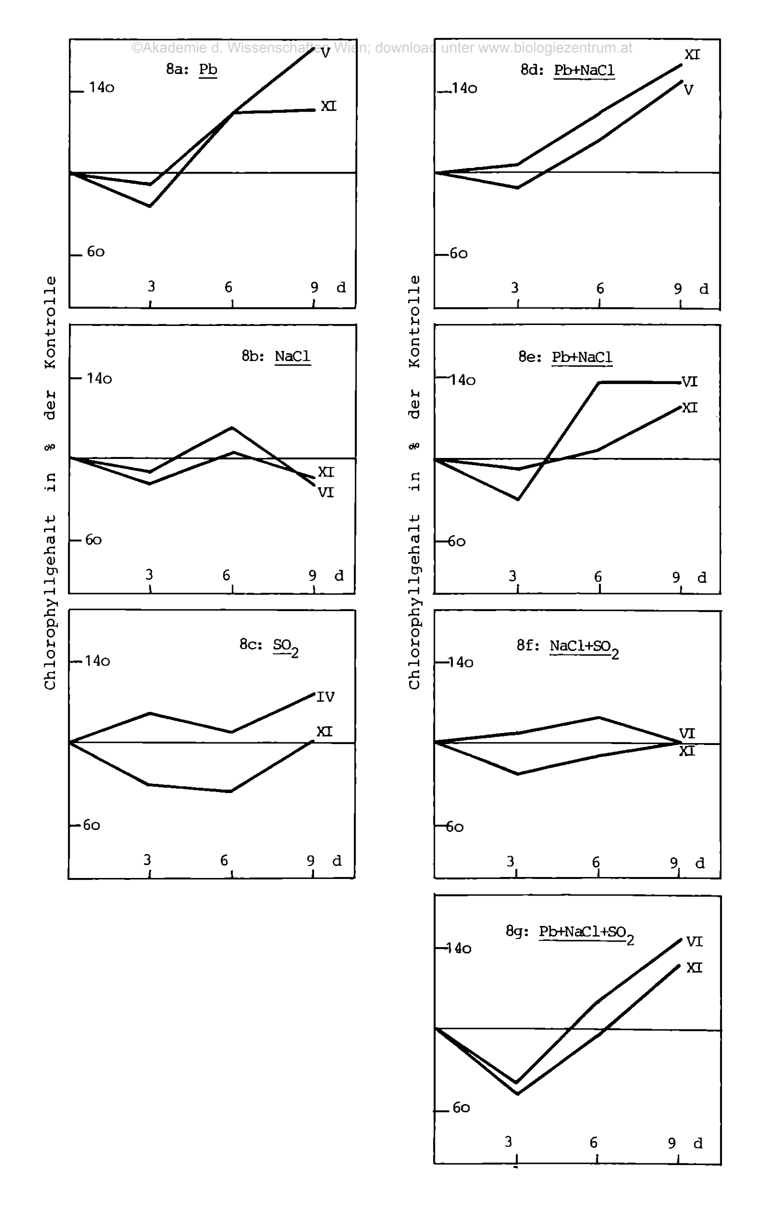


Abb. 8: Chlorophyllgehalt schadstoffbehandelter Flechten *(Hypogymnia physodes)* in %-Kontrolle zu verschiedenen Jahreszeiten; a bis g wie in Abb. 6; die römischen Zahlen geben den Versuchsmonat an.

stellen, daß die Veränderungen bei der Novemberserie prinzipiell weniger ausgeprägt sind; häufig zeigt sich eine Art sigmoider Charakteristik, ein „Pendeln" um die Kontrolle (= 100 %). Dagegen weichen die Werte der Frühjahrsserie weitaus deutlicher nach unten (z. B. Blei, Blei-Kochsalz, Blei-Schwefeldioxid) bzw. nach oben (z. B. Kochsalz) ab. Schwefeldioxid zeigt ein aberrantes Verhalten. Da das Chlorophyll wahrscheinlich nicht den Hauptangriffspunkt bei den verwendeten Schadstoffdosen darstellt, ließe auch hier wieder die stoffwechselphysiologisch höhere herbstliche Aktivität der Lichenen eine Art „Regulation" bei der Novemberserie denkbar erscheinen. Das Verhalten des Gesamtchlorophylls (welches die bereits anderweitig referierte, unaufgeklärte Steigerung aufweist [vgl. PUNZ, i. pr.]) scheint wieder weniger saisonal differenziert; immerhin treten auch hier gelegentlich bei der Novemberserie (prozentuell) geringere Abweichungen von der Kontrolle auf als im Frühjahr (z. B. Blei, Blei-Schwefeldioxid).

2. *Temperatur und Schadstoffwirkung*

Die Wechselbeziehung zwischen Temperatur und Schadstoffwirkung ist fraglos äußerst komplexer Natur: Zunächst ist die Temperatur v o r der Schadstoffeinwirkung bestimmend für den allgemeinen physiologischen Zustand der Pflanze, der zwangsläufig (als allgemeine Vitalität, Resistenz u. a. beschreibbar) in das pflanzliche Verhalten gegenüber dem Schadstoff eingeht. Infolgedessen ist es auch keineswegs gleichgültig, bei welcher Temperatur der toxische Streß schließlich gesetzt wird (hier können schon reine Aufnahmeeffekte eine Rolle spielen, wenn in einem für die Pflanze ungünstigen Temperaturbereich keine bzw. nur eine geringe Aufnahme aus Atmo- bzw. Pedosphäre erfolgt). Zuletzt dürfte auch die Temperatur n a c h der Immissionseinwirkung eine Rolle dafür spielen, inwieweit die Schädigung tatsächlich manifest wird, d. h. zum Tragen kommt, bzw. es scheinen ökologische Faktoren imstande zu sein, das entsprechend angepaßte Verhalten der Pflanze zu beeinflussen.

Im Rahmen der referierten Laboruntersuchungen (vgl. PUNZ, i. pr.) wurden auch Temperaturoptimumsgänge von schadstoffbehandelten Flechten ermittelt. Wie in Abb. 9 ersichtlich, sind grundsätzlich (d. h. meistens) zwei Folgewirkungen eines toxischen Stresses zu beobachten, nämlich

a) eine Verschiebung des Temperaturoptimums und
b) eine Verflachung der Optimumskurve.

Eine Verschiebung des Optimums tritt offensichtlich dann nicht auf (bzw. ist nicht erkennbar), wenn die Schadwirkung massiv in allen Temperaturbereichen zur Wirkung kommt (z. B. Abb. 9e, g); hier ist nur die Verflachung (bzw. eine generelle Senkung der Photosyntheserate) zu beobachten. Die Verschiebung des Temperaturoptimums erfolgt grund-

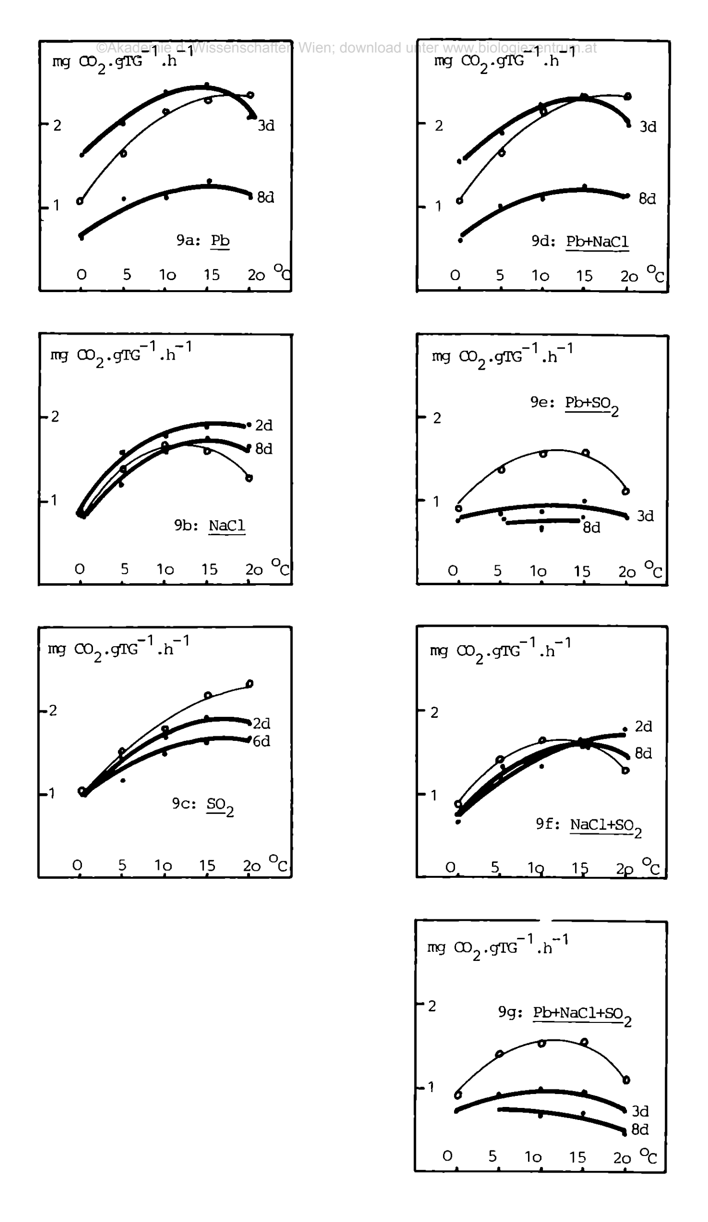


Abb. 9: Photosyntheserate in Abhängigkeit von der Temperatur bei schadstoffbehandelten Flechten *(Hypogymnia physodes)*; a bis g wie in Abb. 6. Schwach ausgezogen: Kontrolle, stark: schadstoffbehandelte Proben. Die Zahlen geben die Anzahl der Tage nach Schadstoffapplikation an (vgl. PUNZ, i. pr.).

sätzlich nach niedrigeren Temperaturen (Ausnahme: Kochsalz, das jedoch im Untersuchungszeitraum keine echte „Schad"wirkung, d. i. eine gegenüber der Kontrolle verminderte Photosynthese bewirkte, und Kochsalz-Schwefeldioxid). Möglicherweise erfolgte die Schädigung vor allem in jenem Temperaturbereich, der zum Zeitpunkt der Schadstoffeinwirkung aktiver ist; dies würde die Verschiebung des Optimums einigermaßen erklären. Die Verflachung der Photosynthese-Optimumskurve dagegen kann wohl als generelle Verminderung der Photosynthese unter Schadstoffeinfluß gedeutet werden, wobei es im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen offen blieb, ob der Angriffspunkt des Schadstoffs direkt an der Photosynthese (Chlorophyll, Enzyme...) lag oder ein indirekter Schadeffekt (etwa über die Beeinflussung des Wasserhaushalts bzw. der Wasserspeicherkapazität, vgl. KERSHAW, 1972; KÖHLE, 1977) vorlag; zweifellos kommt bei der Kausalinterpretation derartiger Phänomene ergänzenden Untersuchungen in dieser Richtung eine gewisse Bedeutung zu (vgl. TÜRK und CHRIST, 1978; PUNZ, i. pr.). Es bleibt schließlich noch hinzuzufügen, daß im allgemeinen die besprochenen Reaktionen nach zwei bis drei Tagen ausgeprägter auftraten, dagegen scheint die Schädigung nach acht Tagen bereits weiter fortgeschritten zu sein. Die Klärung der Frage, ob es sich dabei um eine allgemeine Erscheinung handelt oder auf die kurzfristig-massive Intoxikation der Flechten zurückzuführen ist, muß weiteren Untersuchungen vorbehalten bleiben. Die Tatsache, daß infolge der beobachteten Optimumsverschiebung der Photosynthese eine Temperaturänderung nach Schadstoffbelastung u. U. einen wesentlichen Einfluß auf die tatsächliche Manifestierung eines Schadens ausüben könnte, läßt eine Klärung der hier aufgeworfenen Fragen als nicht unwesentlich für die Praxis der Bioindikation erscheinen (vgl. auch den folgenden Abschnitt).

3. *Freilandversuche* (vgl. auch PUNZ, i. pr.)

Um weitere Aufschlüsse über den Wert der Photosynthese exponierter Flechten als Bioindikator, insbesondere in Hinblick auf die unter III., 1., 2. besprochenen Faktoren, zu gewinnen, wurden Flechten in der beschriebenen (Kap. II.) Weise ausgebracht. Wie bereits in Material und Methoden beschrieben, wurden die Flechten so exponiert, daß lediglich ein Schadstoffgradient, nicht aber unterschiedliche klimatische Faktoren zu erwarten waren. Der Bleiwert der autobahnnahen Flechten liegt etwa doppelt so hoch wie derjenige der weiter entfernten (Abb. 1b), was etwa den bei FRÜHWIRTH (1974) referierten Ergebnissen entspricht (vgl. auch LAAKSOVIRTA et al., 1976; TAKALA und OLKKONEN, 1976).

Zunächst ist anzumerken, daß sich bei den Felduntersuchungen ein ähnliches Phänomen wie bei den entsprechenden Laborexperimenten zeigt: Als Folge der Streßeinwirkung (um die Situation der autobahn-

nahen Flechten in Relation zu ihren weiter entfernten „Kontrollflechten" als vorderhand nicht weiter spezifizierten „Streß" zu klassifizieren) kommt es zu einer Verschiebung und Verflachung der Temperatur-Optimumskurve der Photosynthese. Die Winterserie (Abb. 10) zeigt hiebei zunehmende Verschiebung des Optimums zu höheren Temperaturen, demgegenüber ist die Sommerserie (Abb. 11) durch eine mehr oder minder ausgeprägte Senkung des Temperaturoptimums charakterisiert (vgl. FARRAR, 1973).

(Für den Juniwert mußten infolge Ausfalls einer Meßserie jene Flechtenproben verwendet werden, die in 1 m über dem Boden exponiert waren. Die wesentlich deutlichere Ausprägung der beschriebenen Phänomene schon nach einem Monat erscheint damit plausibel, da diese Flechten jedenfalls stärker der Streßwirkung ausgesetzt waren als die bodennah exponierten, durch die Vegetation teilweise geschützten Proben.)

Auf die Absolutwerte der Photosyntheseraten (Winterserie: Kontrolle Autobahn, Sommerserie: umgekehrt) sei lediglich hingewiesen (vgl. SCHUMM, 1975: höhere Schadindizes im Winter). Methodisch wurden diese aber (in Hinblick auf die geringe Probenzahl und die bekannte intraspezifische Variabilität der Flechten) nicht zur Interpretation herangezogen. Die Werte der provisorischen Wassergehaltsbestimmung sind in Abb. 12 wiedergegeben und zeigen eine (wiewohl eher geringe) Tendenz zur Abnahme des Wassergehalts in Autobahnnähe. (Ein Einzelversuch zeigte, daß einmonatige Kultur unter Laborbedingungen den Unterschied zwischen Proben von beiden Standorten [3 Monate Expositionszeit] praktisch vollständig verschwinden ließ.)

Auf Anhieb scheinen die Ergebnisse der Freilanduntersuchungen eine deutliche Bestätigung der bereits im Labor gewonnenen Erkenntnisse darzustellen: Der jeweils aktive Temperaturbereich der Photosynthese wird maximal geschädigt und das Optimum im Winter in einen höheren, im Sommer in einen tieferen Temperaturbereich verschoben. Für diese Deutung bleibt es zunächst irrelevant, daß die Schadstoffbelastung lediglich als zunächst nicht weiter aufgelöste Summe verschiedener Immissionskomponenten betrachtet wird und daß es nicht bekannt ist, ob der genannte Effekt auf eine Schädigung von Enzymsystemen, eine Veränderung des Wasserhaushalts oder andere Komponenten zurückzuführen ist (vgl. KERSHAW, 1972; PUCKETT, 1976; MAIER, 1978; TÜRK und CHRIST, 1978); dasselbe gilt auch für die Verflachung der Optimumskurve (Kap. III., 2.). Eine wesentliche Schwäche in Hinblick auf den Versuch einer Kausalinterpretation stellt dagegen dar, daß nicht nur reine Temperatureffekte für dieses jahreszeitlich unterschiedliche Verhalten verantwortlich sein müssen. Jedenfalls sind auch eine Veränderung im Schadstoffmuster (etwa eine höhere Grundkonzentration des Luftschwefeldioxids in der winterlichen Heizperiode, das Einsetzen der winterlichen Salzstreuung,

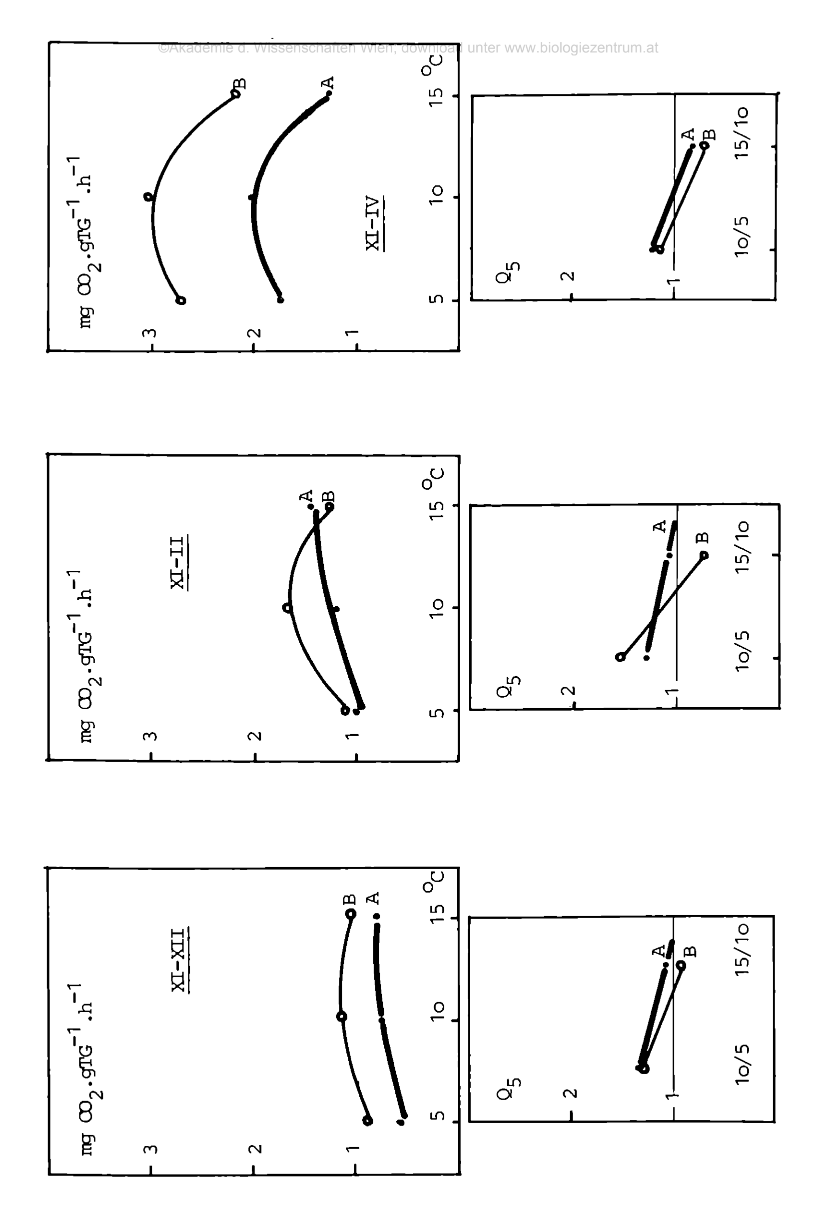
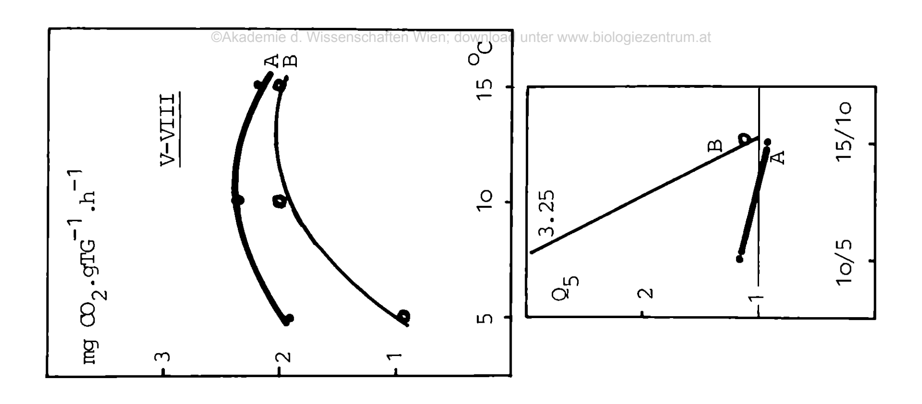


Abb. 10: Photosynthesewerte in Abhängigkeit von der Temperatur und Q_5 transplantierter Flechten; A – 8 m von der Autobahn, B – 90 m von der Autobahn. Die römischen Zahlen geben die Expositionsdauer (Kalendermonate) an.



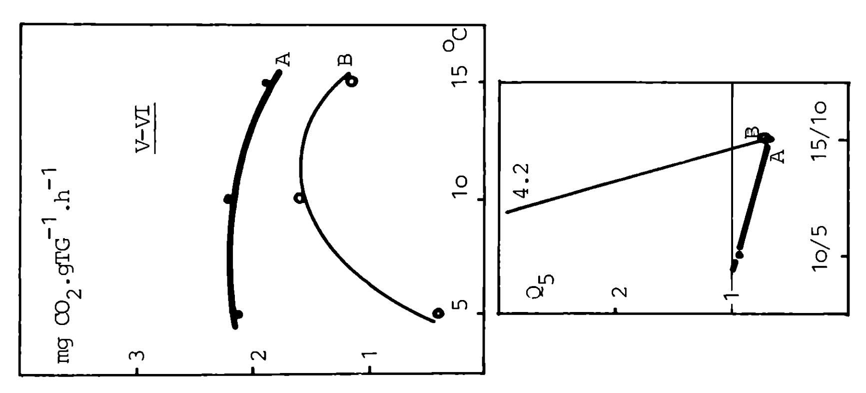


Abb. 11: wie Abb. 10.

veränderte Verkehrsfrequenz – und damit verändertes Bleiaufkommen), trophische Effekte (Staub!) und anderes mehr in Rechnung zu stellen, wobei die spezifischen Wirkungen der genannten Faktoren auf die Photosynthese ebenfalls erst in entsprechenden Experimenten zu verifizieren wären (im Laborversuch etwa senkte SO_2 das Temperaturoptimum der Photosynthese, wohingegen es durch Kochsalz erhöht wurde; wobei erst spezielle Untersuchungen klären könnten, inwieweit diese Effekte bei anderen Konzentrationen und modifizierten Versuchsbedingungen ebenfalls Verschiebungen bedingen). Auch die Möglichkeit, daß Flechten, die zu unterschiedlichen Jahreszeiten gesammelt wurden, unterschiedlich auf Schadstoffe reagieren (vgl. III., 1.), kann mit diesem Versuchsansatz nicht geklärt werden. Es bleibt mithin festzustellen, daß selbst ein derart simplifiziertes Freilandmodell, wie es in der vorliegenden Arbeit angewandt wurde, eine Fülle potentiell relevanter Faktoren aufweist, die ohne ge-

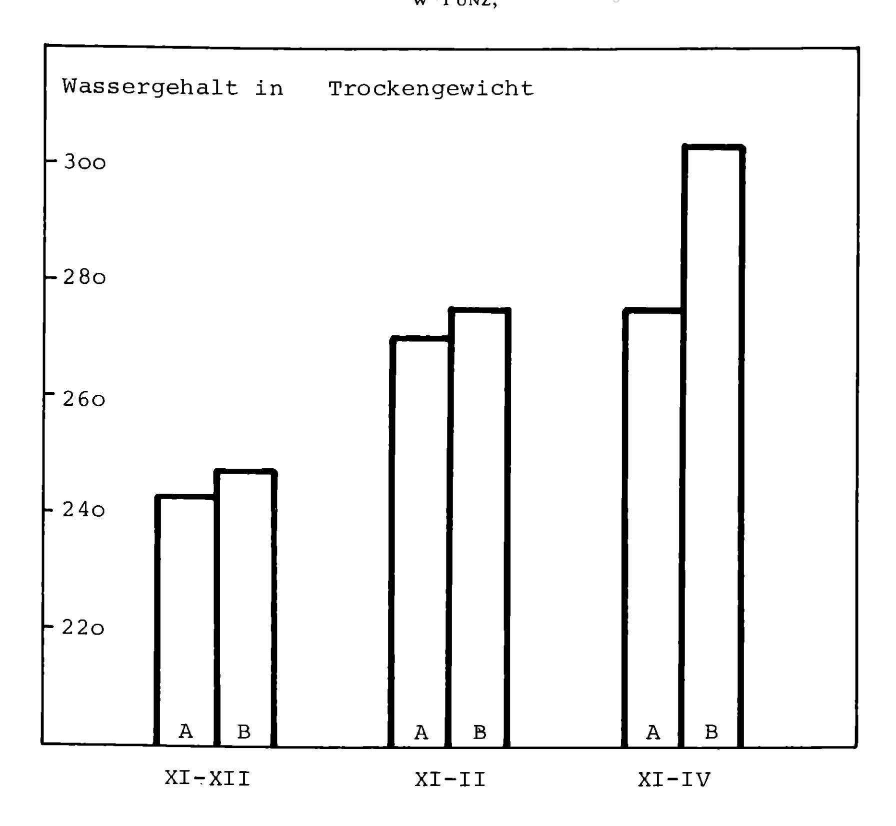


Abb. 12: Wassergehalte transplantierter Flechten in %-Trockengewicht (Angaben ansonsten wie in Abb. 10).

naue Kenntnis des Verhaltens von Flechten unter definierten Bedingungen einerseits, Kenntnis der Noxen, Klimafaktoren etc. andererseits als Unbekannte in das Resultat eingehen müssen. Schließlich erscheint das angeführte Beispiel als mahnendes Exempel, daß Ergebnisse von Freilandversuchen, selbst wenn sie sich in ein erwartetes Bild einzufügen scheinen, nur mit äußerster Vorsicht interpretiert werden dürfen, solange nicht zweifelsfrei ausgeschlossen werden kann, daß lediglich ein zufälliges Zusammenspiel von Einzelfaktoren für ein solches Resultat verantwortlich ist.

IV. Besprechung der Ergebnisse

Der Einsatz von transplantierten Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung wird nun bereits seit rund zwanzig Jahren mit stets verfeinerten Methoden, jedoch mit häufig zweifelhaftem Erfolg betrieben. Von der einfachen optischen Auswertung nach Exposition (bereits mehrfach standardisiert, vgl. z. B. STEUBING, KLEE und KIRSCHBAUM, 1974; SCHLEE, 1979) bis hin zum Einsatz der Photosynthesemessung als sensiblem Indikator der Vitalität (KÖHLE, 1977, u. v. a.) spannt sich der Bogen; in Hinkunft dürfte auch ein vermehrter Einsatz von Enzymen und Enzymmusteranalysen erwägenswert sein (vgl. KUZIEL, 1974; MAIER, 1978). Auf der anderen Seite steht das Wissen darum, daß eine zunehmende Anzahl von Faktoren zu einer kritischen Einschätzung der referierten Methoden geführt hat. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit zählen dazu insbesondere die intraspezifische Variabilität der Flechten, ihr regional verschiedenes Verhalten, jahreszeitliche Veränderungen des Flechtenstoffwechsels, kleinklimatische Bedingungen wie Licht, Temperatur, Feuchtigkeit etc. vor, während und nach Schadstoffbehandlung, die Modifikation der Schadstoffwirkungen durch Wuchsform der Flechten, durch pH, Wasser und andere Faktoren, durch Schadstoffkombinationen u. v. a. (vgl. PEARSON, 1973; TÜRK und WIRTH, 1974; WIRTH und TÜRK, 1974; TÜRK und WIRTH, 1975; WIRTH und TÜRK, 1975; KÖHLE, 1977; RIEDL, 1978; PUNZ, i. pr.).

Betrachtet man im Lichte der vorangeführten Probleme die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, so scheinen zunächst die folgenden Konsequenzen für künftige Versuche unabdingbar zu sein:

- Sollte sich die Temperatur-Optimumsverschiebung der Photosynthese als ein allgemeines Phänomen bei Schadstoffversuchen verifizieren lassen, so besteht potentiell die beträchtliche Gefahr, durch Messung in einem einzigen Temperaturbereich ein einseitiges bzw. falsches Ergebnis zu erhalten. (Die genannte Möglichkeit ist in Abb. 13 schematisch angedeutet: Isolierte Messungen, die entweder im Temperaturbereich „A“ bzw. „B“ erfolgen würden, ergäben ein völlig konträres Bild in Hinblick auf die Wirkung des untersuchten Schadstoffs.)
- Der physiologische Zustand der eingebrachten Flechten (insbesondere in Abhängigkeit von der Jahreszeit) kann z. T. bedeutende Veränderungen in der Manifestierung von Immissionswirkungen bedingen (vgl. Kap. III., 1.).
- Der bereits modellhaft vereinfachte Ansatz des unter III. 3. referierten Freilandversuchs (klimatische Homogenität, variabler Abstand von der Schadstoffquelle) erweist die nichtsdestoweniger beträchtliche Komplexität der möglichen auftretenden Phänomene, sofern nicht — ebenfalls unter der Voraussetzung einigermaßen gleichförmiger klimatisch/

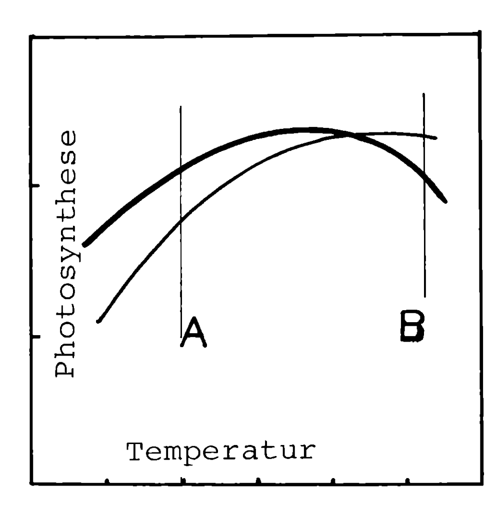


Abb. 13: Schematische Darstellung zur Temperaturabhängigkeit der Photosynthese bei schadstoffbelasteten (stark ausgezogene Linie) und unbelasteten Pflanzen (Daten aus Abb. 9). Unterschiedliche Aussagen bei Messung im Temperaturbereich „A" und „B"

orographischer Bedingungen – lediglich ein einzelner Schadstoff vorhanden ist.

In Hinblick auf die bereits mehrfach zitierten Ergebnisse aus der Literatur mehren die hier zusammengestellten Daten jedenfalls den Zweifel an einem einfachen und effektiven Einsatz von Flechtentransplantaten für die Zwecke der Bioindikation. Fraglos wird es bei gewissen Schadstoffsituationen bzw. Immissionstypen möglich sein, mit einigem Erfolg diese Methode anzuwenden (insbesondere bei Vorliegen von einzelnen Schadstoffen, s. o.). Desgleichen mag unser stetig wachsendes Wissen über die Physiologie intakter wie immittierter Flechten eine Abschätzung der zahlreichen Interaktionsmöglichkeiten bei derartigen Versuchen erleichtern; insbesondere sollte die simultane Erfassung von Daten der Photosynthese und des Wasserhaushalts, ergänzt durch entsprechende Klimawerte, sowie die Berücksichtigung von Grundlagenuntersuchungen es ermöglichen, die bioindikative Aussagekraft von Flechtentransplantaten einigermaßen zu erhöhen. In manchen Situationen wird jedoch auch die Frage zu stellen sein, ob der Aufwand, welchen die zu fordernde sichere und schlüssige Bioindikation mit Hilfe von Flechten erfordern würde, noch in einem vertretbaren Verhältnis zu den dabei zu gewinnenden Informationen steht bzw. stehen kann.

V. Zusammenfassung

Anhand von Laboruntersuchungen und Transplantationsexperimenten wurde der mögliche Einfluß von Temperatur und Jahreszeit auf die Physiologie intakter und schadstoffbelasteter Flechten untersucht. Die vorliegenden Ergebnisse zu Photosynthese, Chlorophyllgehalt und Wasserhaushalt der Flechte *Hypogymnia physodes* (L.)Nyl. zeigen, daß ohne Berücksichtigung der genannten Faktoren der Aussagewert von physiologischen Flechtenuntersuchungen, insbesondere unter dem Gesichtspunkt einer Bioindikation von Schadstoffen, entsprechend vermindert sein kann.

Dank: Der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie dem Magistrat der Stadt Wien gebührt Dank für die finanzielle Förderung des Projekts. Herrn Univ.-Prof. Dr. K. BURIAN danke ich für die Durchsicht des Manuskripts. Herrn M. ENGENHART danke ich für seine Hilfe bei der Durchführung der Transplantatversuche.

VI. Literatur

ALBERT, R., BEIGL, E., KINZEL, H., STEINER, G. M. (1976): Zur Bestimmung von Blei in Mikroproben von biologischem Material mittels flammenloser Atomabsorptions-Spektroskopie. *Z. Pflanzenphysiol. 80 (1)*, 43–49.

BÜTTNER, R. (1971): Untersuchungen zur Ökologie und Physiologie des Gasstoffwechsels bei einigen Strauchflechten. *Flora 160*, 72–99.

FARRAR, J. F. (1973): Lichen physiology: Progress and pitfalls. Ch. 12 in (FERRY, B. W., BADDELEY, M. S., HAWKSWORTH, D. L., eds.) *Air pollution and lichens*, The Athlone Press Univ., London, pp. 238–282.

FRÜHWIRTH, W. (1974): Die Belastung der Vegetation entlang einer stark frequentierten Autostraße. Hausarbeit aus *Botanik* (Prof. Biebl), Pflanzenphysiologisches Institut der Universität Wien.

GILBERT, O. L. (1970): A biological scale for the estimation of sulfur dioxide pollution. *New Phytol. 69*, 629–634.

HARRIS, G. P. (1971): The ecology of corticolous lichens. II. The relationship between physiology and the environment. *J. Ecol. 59*, 441–452.

KALCKSTEIN, B. (1974): Gaswechsel, Produktivität und Herbizidempfindlichkeit bei verschiedenen tropischen, subtropischen und europäischen Gramineen. Diss. Univ. Wien.

KERSHAW, K. A. (1972): The relationship between moisture content and net assimilation rate of lichen thalli and its ecological significance. *Can. J. Bot. 50*, 543–555.

KÖHLE, U. (1977): Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von Flechten als Bioindikatoren für Luftverschmutzung. Diss. Univ. Tübingen.

Kuziel, S. (1974): Influence of sulfur dioxide on chlorophyll content and catalase activity in some chosen lichen species. *Acta Soc. Bot. Pol.,* Ser. B *43 (4),* 453–458.

Laaksovirta, K., Olkkonen, H., Alakuijala, P. (1976): Observations on the lead content of lichen and bark adjacent to a highway in Southern Finland. *Environ. Pollut. 11,* 247–255.

Maier, R. (1978): Bioindikation von Bleiwirkungen in Pflanzen unter Berücksichtigung von Zeit, Temperatur und Licht mit Hilfe enzymatischer Methoden. Habilitationsschrift Univ. Wien.

Pearson, L. C. (1973): Air pollution and lichen physiology: Progress and problems. Ch. 11 in (Ferry, B. W., Baddeley, M. S., Hawksworth, D. L., eds.) *Air pollution and lichens,* The Athlone Press. Univ., London, pp. 224–237.

Puckett, K. J. (1976): The effects of heavy metals on some aspects of lichen physiology. *Can. J. Bot. 54,* 2695–2703.

Punz, W., in Druck: Beiträge zur Verwendung von Flechten als Bioindikatoren: Der Einfluß von Schadstoffkombinationen. *Sitzg. ber. Österr. Akad. Wiss.*

Punz, W., in Druck: Pollutant combinations and their effects on some aspects of lichen physiology. Tagungsbericht Halle 1979, International workshop on problems of bioindication.

Riedl, H. (1978): Flechten als Bioindikatoren der Luftverunreinigung. Beiträge Umweltschutz, Lebensmittelangelegenheiten, Veterinärverwaltung, Hrsg. Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz 2.

Schlee, D. (1979): Umweltforschung und Biochemie. *Wissenschaft und Fortschritt 29,* 107–112.

Schopfer, P. (1970): Experimente zur Pflanzenphysiologie. Freiburg, Rombach-Verlag.

Schumm, F. (1975): Beiträge zur Photosyntheseleistung der Flechten und ihre Eignung als Maß zur Indikation der Immissionsbelastung der Luft. Diss. Hohenheim.

Smith, D. G. (1962): Biology of lichen thalli. *Biol. Rev. 37,* 537–570.

Stalfelt, M. G. (1939): Der Gasaustausch der Flechten. *Planta 29,* 11–31.

Steubing, L., Klee, R., Kirschbaum, U. (1974): Beurteilung der lufthygienischen Bedingungen in der Region Untermain mittels niederer und höherer Pflanzen. *Staub – Reinhalt. Luft 34,* 206–209.

Stocker, O. (1956): Wasseraufnahme und Wasserspeicherung bei Thallophyten. In (Ruhland, W.) *Handbuch der Pflanzenphysiologie,* Springer Verlag, Berlin–Göttingen–Heidelberg, Bd. III, pp. 160–172.

Takala, K., Olkkonen, H. (1976): Lead content of the lichen *Pseudevernia furfuracea* in the urban area of Kuopi, Central Finland. (Kärenlämpi, L., ed.) Proceedings of the Kuopi Meeting on Plant Damages Caused by Air Pollution, Kuopi 1976.

Türk, R., Christ, R. (1978): Untersuchungen über den Flechtenbewuchs an

Eichen im Stadtgebiet Salzburgs und über den Wasserhaushalt einiger charakteristischer Flechten. *Phyton 18*, 107–126.

TÜRK, R., WIRTH V. (1974): Der Einfluß des Wasserzustands und des pH-Wertes auf die SO_2-Schädigung von Flechten. *Verh. Ges. f. Ökologie*, Erlangen, pp. 167–172.

TÜRK, R., WIRTH, V. (1975): The pH-dependence of SO_2-damage to lichens. *Oecologia 19*, 285–291.

VERSEGHY, K. (1972): Saisonale Veränderungen des Chlorophyllgehalts einiger xerothermer Flechtenarten. *Bot. Közlem. 59, kötet 2. füzet.*

WILHELMSEN, J. B. (1959): Chlorophylls in the lichens *Peltigera, Parmelia* and *Xanthoria. Botan Tidsskrift 55*, 30–36.

WIRTH, V., TÜRK, R. (1974): Über die SO_2-Resistenz von Flechten und die mit ihr interferierenden Faktoren. *Verh. Ges. f. Ökologie*, Erlangen 1974, 173–179.

WIRTH, V., TÜRK, R. (1975): Zur SO_2-Resistenz von Flechten verschiedener Wuchsform. *Flora 164*, 133–143.